第40卷 第1期
2023年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 1
Jan. 2023

山西省林地扩展优先区识别

孟 娜， 张 颖

（北京林业大学经济管理学院，北京 100083）

摘 要： 过去70 a我国在干旱半干旱地区展开大规模植树造林活动并取得显著成效，由于受人类活动和气候影响，导致局部地区造林失败。虽然在干旱地区造林的潜力被得到认可，但是造林具体应集中在哪些微观地区尚未可知。本文以黄土高原典型区域山西省为例，构建宜林地识别框架，利用PLUS模型和马尔可夫链模拟2030年不同情景下土地利用变化，分析林地扩张、林分内部变化趋势和空间分布。结果表明：当前山西省林地增长空间为5.38%，且东南部为主要潜在增长区，中西部林地边缘存在有林地退化的可能，而北部林地破碎化程度较高；林分内部互相转换频率较高；按扩张潜力，依次为有林地>灌木林>疏林地>其他林地。本研究可为山西省植树造林有效管理和森林固碳水平提升提供参考。

关键词： PLUS模型；马尔可夫链；植树造林；场景模拟；优先区识别；干旱半干旱地区

过去60 a全球干旱半干旱地区土地退化面积不断扩大，平均每年退化面积约有1000 hm^2[1]。过度的人类活动以及自然因素导致干旱半干旱地区土地退化严重，当前退化土地的恢复成为干旱半干旱地区面临的重大挑战之一。在此背景下，许多国家展开了包括植树造林在内的森林恢复项目，旨在缓解因干旱而造成的地方经济损失[2-3]。

森林恢复是维护碳平衡、缓解全球气候变暖的有效策略之一。森林生态系统在加强碳储量、提升生态系统承载力、维护生态系统平衡等方面发挥着重要作用[4-6]。由于土地过度利用、林业无序开发、自然灾害等原因，导致全球森林面积净损失达80×10^4 km^2[7]。有研究表明，在当前气候条件背景下，全球约有9×10^8 km^2的森林增长空间[8]。其中，在干旱半干旱地区森林增长的潜力巨大，约占潜在森林恢复面积的36%~42%[9]，但这可能是相对乐观的估计。实际上，在干旱半干旱地区造林面临种种困难，虽然许多国家和组织积极倡导森林恢复的重要性，但是面对当前紧迫的全球变暖趋势，适宜干旱半干旱地区森林恢复的潜在位置在哪，以及如何恢复等问题还没有确切的定论[10]。

综上，围绕干旱半干旱地区造林的重要课题，已有研究主要从以下几个方面进行了论述：第一个核心议题是关于造林的适宜性。对于在植树造林过程中的适宜度，学术界主要有以下两种观点。一是植被选择的适宜性[11]，在干旱半干旱地区，外来单一植被的种植往往会导致后期为维护生物多样性而产生高昂成本，造成不必要的政府负担[12]。二是造林规模的适宜性，大规模盲目的森林扩张可能更易受到本地干旱化的影响，包括在不适宜的地点进行大规模的造林[13]。以上两种观点表明不适宜的人工修复会造成后期森林管护成本增加。虽然学术界越来越意识到这一问题的严重性，但是目前国内关于在微观地区造林的空间数据和信息尚不完善，这导致无法准确掌握干旱半干旱地区造林的空间适宜与否。

第二个核心议题是关于干旱半干旱地区造林的贡献度。在诸多学术研究中，关于旱地森林的研究往往少于其他生物群落，虽然与其他生物群落相比旱地森林的植被覆盖率极低，但是其在全球碳循环中发挥着重要作用，部分旱地森林的碳密度可能高于或近于临近森林生物群落的碳密度[14-16]。我国

收稿日期： 2022-06-10； **修订日期：** 2022-08-21
基金项目： 国家自然科学基金项目（72173011）
作者简介： 孟娜（1994-），女，博士研究生，主要研究方向为生态系统服务价值评估研究. E-mail: mengna19940222@163.com
通讯作者： 张颖. E-mail: zhangyingbjfu@hotmail.com

黄土高原即为典型代表区域,该地区森林植被的恢复显著提升了区域总碳储量[17-19]。为此,我国根据《中国森林经营规划(2016—2050)》(http://www.forestry.gov.cn/),需进一步在干旱半干旱地区建立大量人工林来实现碳中和目标。而在干旱区域实施造林工程,需要考虑到因造林而涉及在生态、经济和社会复合生态系统中的权衡问题。因此,潜在造林面积的调查和造林区域的识别对干旱半干旱地区造林具有重大意义。

第三方面需要重点关注我国对植树造林的政策把控。森林恢复被视为是国家自主贡献的主要组成部分。从我国第三次全国土地调查来看,我国政府对当前的生态修复似乎越来越保持谨慎的态度,严格把控耕地向林地、草地和园地的转换成为主要趋势,退耕还林的表述也在进一步被弱化,反而更加强调耕地保护红线的重要性。因此,对于干旱半干旱地区造林的实现更加要求对区域选择的重要性和造林效率的提升。

综上,梳理以上三方面的研究对我国干旱半干旱地区造林具有重要意义。黄土高原作为我国干旱半干旱地区典型的造林区域,其森林生态修复受到社会各界关注。目前,关于黄土高原地区植树造林的研究主要集中在关于造林过程中的变化[20-21]、造林的相关影响因素评析[22-23]以及造林成效[24-25]等方面。少部分研究集中在以气候条件和政策为背景,对造林潜力评估研究[26]。但仍面临着具体方法论方面的困扰:首先,针对森林生态修复的研究很少体现在森林恢复过程中关于林分内部变化,例如,某些区域受气候和人类活动影响,森林内部出现灌木林向疏林地退化的趋势,而这在森林总体面积上却并未表现出来,但显然森林质量是退化的;其次,相关研究关于受人类活动干扰导致土地利用变化的森林动态研究也较少体现。因此,结合上述几个方面关于造林的相关论证,本文认为,因人为因素促使土地利用变化下的森林生态恢复的具体造林潜力区还需进一步挖掘,在森林恢复过程中关于林分内部的变化也需进一步分析。

山西省是黄土高原地区人工造林典型区域,境内宜林地面积广阔。近年来,在耕地保护政策下耕地向林地、草地转化面积的减少限制了退耕还林(草)的发展空间。此外,自然因素和人为管理不善也导致林分质量下降。因此,本研究以山西省为主要研究区域,运用PLUS模型和马尔科夫链对不同情景下林地利用结构变化进行模拟,特别对林分内部之间转化进行细分。本研究目的:(1)评估林地生长的区域适宜程度;(2)评估山西省林地增长空间及其分布情况;(3)识别林地优先发展区域。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区概况

山西省位于我国中部地区(34°34′~40°44′N,110°14′~114°33′E),地处第二阶梯,东起太行山,西至吕梁山,中部为汾河河谷,形成“两山夹一川”的地形特点。地理单元相对闭塞,地势由东北逐渐向西南方向下降,主要景观单元为山地高原、山地、丘陵。为温带大陆性季风气候,全年降水季节分配不均,介于358~621 mm,水资源相对较少。省域内的主要生态系统为森林生态系统、湿地生态系统以及草原生态系统,但生态系统总体较为脆弱[27]。

1.2 数据来源

本研究数据主要包括土地利用数据和土地利用变化驱动因子。其中,土地利用类型数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(分辨率30 m×30 m)。为直观分析山西省林地内部转换情况,各土地利用类型为有林地、灌木地、疏林地、其他林地、耕地、草地、水域、建设用地以及未利用地。对于宜林地识别的土地利用需求驱动因子主要分为3大类(表1),即土壤驱动因子(9项)、社会经济驱动因子(10项)以及气候环境驱动因子(5项)。其中,坡度和坡向数据根据DEM数据计算获得,气温和降水数据主要采用1970—2000年的均值代替。

2 模型与方法

本研究基于马尔科夫链、PLUS模型构建了一个综合识别框架(图1),首先,采用马尔科夫链预测山西省不同情景下土地需求预测值。其次,利用PLUS模型将预测值和各土地利用驱动因子分配到不同土地利用类型中,获得多情景下土地利用空间分布情况并进行对比分析。

2.1 基于土地利用需求数量和空间约束的多情景设置

本研究利用马尔可夫链旨在依据可持续发展目标(SDGs)[28],设置不同情景[29],并对不同情景下

表1　土地利用需求变化驱动因子

Tab. 1　Drivers of land use demand change

数据类型	数据名称	年份	分辨率/m	数据来源
土壤驱动因子	土壤融水量；土壤PH值；距基黏岩深度；有机土壤的累积概率；土壤有机碳储量；含沙量；黏土含量；土壤纹理	2017	250	https://www.isric.org/
	土壤类型	1995	1000	http://www.resdc.cn/
社会经济驱动因子	人口；GDP；临近城市；临近农村；临近铁路；临近高速公路；临近主干道；临近二级公路；临近三级公路；临近四级公路	2015	30	https://www.openstreetmap.org/
气候及环境驱动因子	DEM；坡度；坡向	2016	90	https://lpdaac.usgs.gov/
	年平均温度；年降水量	1970—2000	30	http://www.worldclim.org/

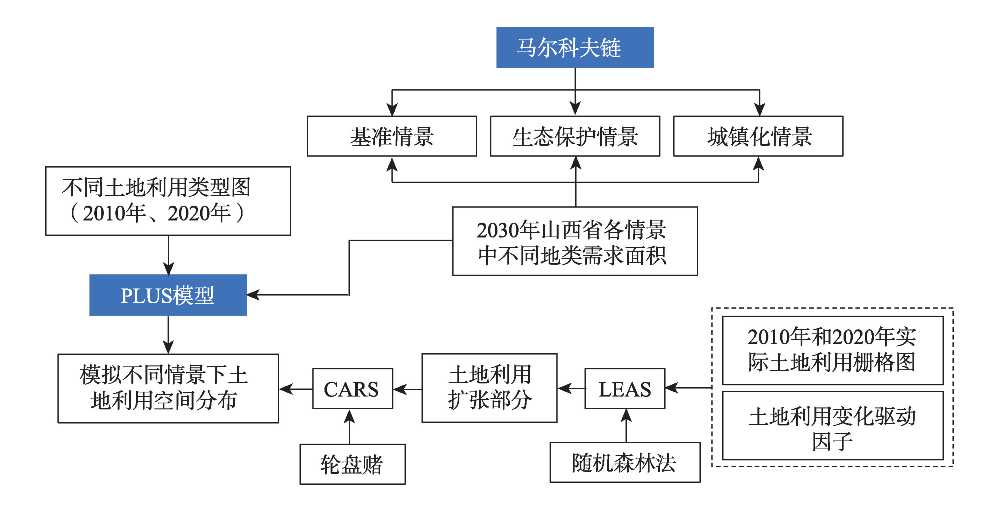


图1　PLUS模型和马尔可夫链模型集成框架

Fig. 1　Integration framework of PLUS model and Markov chain mode

未来土地利用需求面积进行预测和设置。不同情景下土地利用需求值的变化主要通过改变2010—2020年马尔可夫链中土地利用类型间的转换概率实现（表2）。此外，转换约束矩阵表明一种土地利用类型向另一种土地利用类型转变的权限，“1”表示可以转换，“0”表示禁止转换。以2030年为目标年，设置3种发展情景来预估未来山西省不同发展情景下土地利用变化。

表2　2010—2020年土地利用类型转移概率矩阵

Tab. 2　Probability matrix of land use type transfer between 2010 and 2020

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.8888	0.0271	0.0103	0.0016	0.0298	0.0375	0.0010	0.0038	0.0001
2	0.0277	0.8426	0.0127	0.0009	0.0412	0.0670	0.0017	0.0060	0.0001
3	0.0327	0.0283	0.7247	0.0018	0.0931	0.1073	0.0012	0.0107	0.0002
4	0.1043	0.0468	0.0278	0.6230	0.1050	0.0439	0.0063	0.0424	0.0005
5	0.0134	0.0139	0.0114	0.0051	0.7907	0.1082	0.0055	0.0517	0.0002
6	0.0234	0.0294	0.0142	0.0016	0.1400	0.7723	0.0020	0.0167	0.0003
7	0.0165	0.0108	0.0086	0.0056	0.2388	0.0825	0.5666	0.0641	0.0064
8	0.0028	0.0032	0.0026	0.0017	0.1748	0.0213	0.0039	0.7894	0.0003
9	0.0084	0.0084	0.02633	0.0098	0.2453	0.1266	0.0620	0.0867	0.4265

注：表中1表示有林地；2表示灌木林；3表示疏林地；4表示其他林地；5表示耕地；6表示草地；7表示水域；8表示建设用地；9表示未利用地。下同。

（1）基准情景：该情境下，对土地利用不设置约束条件，假设2020—2030年的土地转移概率和2010—2020年的转移概率相同，人口及经济发展模式继续延续当前状态发展。该情景模拟了无外部约束力下的土地利用发展情况。

（2）生态保护情景：按照《全国森林经济规划（2016—2050年）》和《山西省国土空间规划（2020—2035年）》的要求设置生态保护情景，山西省林地将被进一步保护，对林地向其他地类的转换进行限制（表3）。在该情景中2020—2030年4类林地转入概率将比2010—2020年高，转出概率下降，同时限制建设用地的扩张（表4）。

（3）城镇化发展情景：在城镇化情景下，建设用地会过度占用耕地、草地等成为必然。依据这一实际，相比于2010—2020年土地转移概率，本研究将各类林地、耕地、草地、未利用地转入建设用地的概率提高至20%，建设用地向其他土地利用类型转出的概率降低30%（排除耕地）（表5）。土地转换矩阵与基准情景的土地转换矩阵一致（表6）。

2.2 PLUS模型

PLUS模型主要由两个基本模块组成，分别为用地扩张分析策略LEAS和CARS模型[30-32]。LEAS策略通过提取两期土地利用类型扩张部分，借助随机森林法对扩张部分采样并分析其驱动力；CARS模

表3 生态保护情景下各土地利用类型转换矩阵

Tab. 3 Conversion matrix for each land use type under the ecological conservation scenario

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0	0	1	0	0
3	1	1	1	1	0	1	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	0
6	1	1	1	0	0	1	1	1	0
7	1	1	0	0	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表4 生态保护情景下各土地利用类型转换比重

Tab. 4 Share of land use conversion by type under the ecological conservation scenario

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	–	–	–	20%	−20%	−20%	–	−30%	−30%
2	20%	–	–	–	−20%	−10%	–	−30%	−30%
3	20%	–	–	–	−10%	−10%	–	−20%	−20%
4	20%	–	–	–	−10%	−10%	–	−20%	−20%
5	20%	–	–	–	–	–	–	–	–
6	–	20%	20%	–	−20%	−20%	–	–	–
7	–	–	–	–	–	–	–	–	–
8	–	–	–	–	–	–	–	–	–
9	10%	20%	20%	20%	–	10%	10%	–	–

表5 城镇化发展情景下各土地利用类型转换比重

Tab. 5 Share of land use conversion by type under the urbanisation development scenario

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	–	−20%	−20%	−20%	−30%	−20%	–	−10%	−30%
2	20%	–	–	−20%	−20%	−20%	–	–	−20%
3	20%	20%	–	−20%	−20%	−20%	–	–	−20%
4	–	–	20%	–	–	–	–	20%	–
5	10%	20%	20%	20%	–	–	–	20%	–
6	–	20%	20%	–	−20%	−20%	–	20%	−20%
7	–	–	–	–	−20%	–	–	−20%	−20%
8	−30%	−30%	−30%	−30%	–	−30%	−30%	–	−30%
9	10%	20%	20%	20%	–	–	20%	20%	–

表6 城镇化发展情景下各土地利用类型转换矩阵

Tab. 6 Conversion matrix for each land use type under urbanization development scenarios

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
2	1	0	1	0	0	0	1	0	1
3	1	1	1	1	0	1	0	0	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	0	0	1	1	1	1
7	1	1	0	0	0	0	1	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1

型基于随机种子生成和阈值递减机制,依据自适应系数、领域效应和开发概率来模拟未来土地利用需求。

需要注意的是,在本研究中PLUS模型的相关参数设置,LEAS模块中,随机采样为50,采样率为0.01。在CARS模型中,斑块生成阈值为0.9,随机斑块种子概率为0.1,随机种子比例为0.001,邻域范围为3。

在模拟之前,须利用PLUS模型对山西省土地利用模拟进行精度验证。首先,选取影响土地利用/土地覆盖变化的26种因素输入到模型中,并生成9种土地利用类型的适宜性概率(图2)。

2.3 模型精度验证

为保证模拟的精准性,利用Kappa系数对PLUS模型的可靠性进行确定,若kappa系数介于0.6~0.8,则表明仿真结果较高,若介于0.8~1.0,则表明模拟与实际高度相符[33]。通过将模拟结果与2020年实际土地利用数据进行对比(图3)。结果发现,Kappa系数为0.86,模拟精度较高,说明PLUS模型对山西省土地利用/土地覆盖变化模拟是有效的,可用于模拟山西省未来土地利用变化状况。

3 结果与分析

3.1 多情景下土地利用需求预测

基准情景、城镇化情景和生态保护情景3种情景下(表7),林地增长面积分别为−4.67 km^2、−4.74 km^2、23.94 km^2,其中,林地和草地的面积占比总体上保持在30%左右,耕地面积占比较大,基本维持在35%左右。此外,林地内部转换频率较高,相比于灌木林、疏林地和其他林地,有林地扩张的可能性更高。

基准情景是对研究区现有土地利用状况的顺延,在这种情景下各类林地的面积总体较为稳定,草地为有林地主要转入对象。耕地流失面积主要转向城市建设用地,表明城镇化与耕地保护的矛盾已经成为山西省发展的潜在隐患。生态保护情景与2020年实际土地利用类型相比,研究区内林地得到很好的保护。各类林地面积总计约增加23.94 km^2,占当前总林地面积的5.38%,有林地是唯一扩张林地,而其他3类林地都有小幅缩减,主要原因是林地内部之间转换率增强,灌木林、疏林地和其他林地向有林地转入的面积分别为1.74 km^2、10.28 km^2、0.37 km^2。城镇化发展情景是基准情景的强化,建设用地增幅较大,与2020年实际相比,增加了10.79 km^2,林地除灌木林外总体上出现了不同程度的退化(表4)。

3.2 多情景下土地空间分布模拟

将3种情景下山西省2030年土地利用面积模拟值输入到PLUS模型中,3种情景下林地扩张区域主要集中在研究区东南部长治盆地附近、中西部太原盆地和北部大同盆地。有林地的面积扩张范围较大一些,灌木林占地面积总体上保持不变,而研究区西北部黑茶山国家自然保护区和东部运城盆地附近疏林地扩张变化更为显著,其他林地面积小幅降低。总体来看,东南部有林地呈现大面积成片扩张,中西部次之,北部林地分布呈碎片化特点。受气候和地形影响,越靠近南部地区,林地恢复和扩张的可能性越大(图4)。在理想状态下(生态保

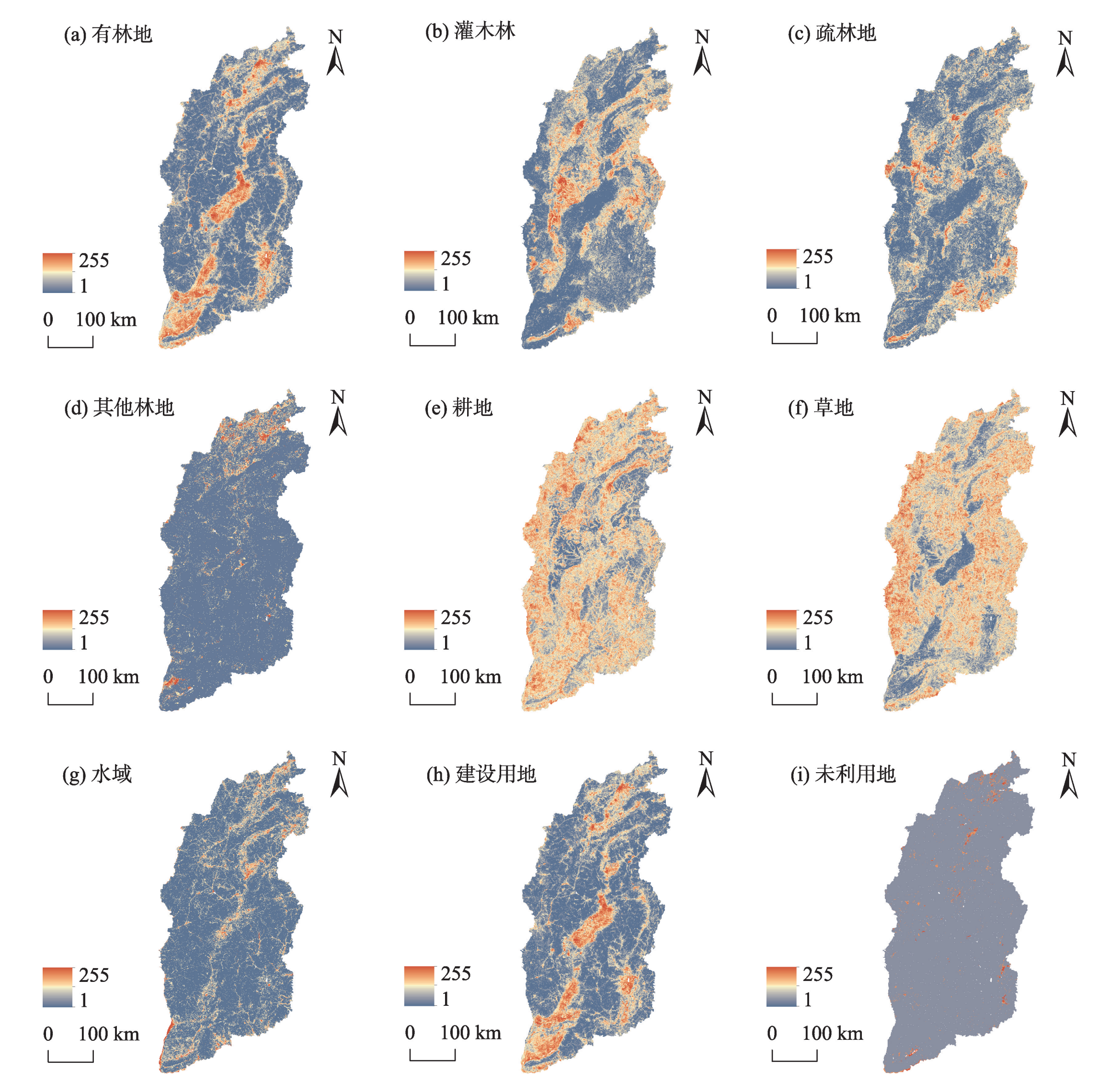


图2 2010—2020年各土地利用类型适宜性概率

Fig. 2 Probability of suitability by land use type 2010-2020

护情景),通过多次对相关参数进行调整,发现林地总面积在468.59 km²上下浮动。我们猜想这可能与山西省生态环境和人类活动等因素有关,制约了林地进一步发展的潜力。我们估测山西省2030年林地总体增长空间约为23.94 km²,占当前林地总面积的5.38%。

3.3 林地扩张典型区域分析

生态保护情景是今后山西省森林修复工程的主要参考,通过提取较为明显的林地扩张区域(A、B、C和D)(图5),并将其与其他情景下的林地变化进行对比,界定出未来山西省林地扩张可能的优先发展区(图6),从而提高山西省植树造林活动效率和固碳水平。此外,由于采取较高分辨率遥感地图,故对于林地优先发展区识别可以精确到县级层面,这也是本文主要特点。

A区主要位于研究区北部,包括大同市和朔州市,该区域林地呈碎片化分布,从林分变化来看,A区域总体表现为耕地向有林地的转换,其他林地转换相对稳定。该地区有林地的扩展趋势较为明显,且在山阴县出现了大片的有林地增长。其他县域也出现了不同程度的林地增长,但相对分散。故在未来10 a中该区应提升植树造林的集约化、效率化水平。

B区主要分布在研究区中西部,涉及忻州市、太原市和吕梁地区,该区域以灌木林为主。与其他情景相比,岚县有林地出现了成片增长的趋势,而在

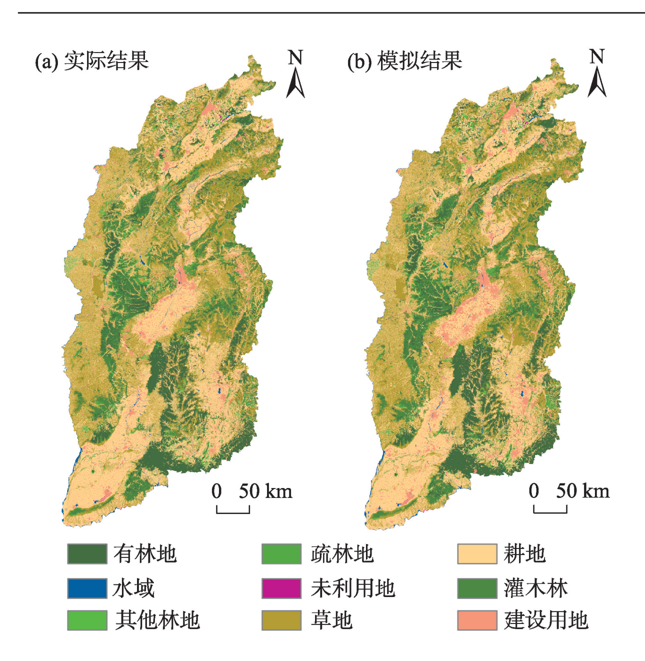


图3　山西省2020年土地利用实际结果和模拟结果

Fig. 3　Land use simulation results for Shanxi Province

交城县、文水县等境内更适宜灌木林生长。在生态保护情景下,交城县边缘地带出现了小面积的有林地退化为疏林地,我们猜想可能是在该情景中,有林地邻域权重达到峰值,出现林地转换的可能性更大。这也需要引起我们的重视,未来该地区也许会出现林地退化的可能性。

C区覆盖了晋城市南部、临汾市东北部以及长治市西北部,结合山西省地形图可知,该区域主要位于太原盆地和临汾盆地。受暖湿气候影响,C区是山西省境内林木主要集中区,且以有林地为主。在不同情景下,C区各类林地之间的转换均呈现稳定状态。值得注意的是位于祁县境内的疏林地变化,与城镇发展情景相比,生态保护情景中有林地在该区域有较大扩展潜力,大面积的疏林地转变为有林地,表明良好的生态保护措施能够推动区域内林木扩展。上述区域在未来林地扩展潜力更大。

D区大部分位于晋城市东南部,少部分位于运城市东南部。该地区也是阳城莽河猕猴国家级自然保护区和太宽河国家级自然保护区重点区域,因此总体生态环境基础较好。有林地主要分布在陵川县境内,且不在同情景中林地之间的内部转换较为稳定,我们猜想这可能与地方已有的生态环境基础有关。而平顺县境内更适合草地生长,在不同情景中该地区草地面积一直较为稳定,而林地扩展却更为缓慢。长治县和壶关县境内出现了大面积的有林地增长,在其他发展情景中,这两个县主要以疏林地为主,在生态保护情景下,调整了林地的参数指标后,出现了大面积的有林地增长,即该县域疏林地和有林地的转换更为明显,上述区域有林地扩展的可能性比较大。

4　讨 论

4.1　关于植树造林与森林修复

森林修复仍然是当前缓解气候变化的最有效战略之一,与传统的“生态修复”不同,基于生态安全格局的植树造林活动更强调治理和修复的“主动适应”[34]。干旱地区受自然条件限制,植树造林活动的有效性有待商榷[35-37]。因此,如何提升造林的科学性和“主动适应”性成为当下山西省生态保护的重要议题。从结果来看,山西省森林生态系统似乎并不十分稳定,在理想的状态(生态保护情景)下,局部地区森林边缘已经出现了森林退化的趋势,如果不调整林地领域权重值,这种情况也许会更严重。耕地仍然是山西省主要的土地类型,这对

表7　多情景下山西省土地利用面积对比

Tab. 7　Comparison of land use areas in Shanxi Province under multiple scenarios　/km²

土地利用类型	2020年实际情景	2030年基准情景	2030年生态保护情景	2030年城镇化情景
有林地	193.67	192.33	230	190.32
灌木林	167.94	164.97	166.2	168.16
疏林地	74.21	74.21	63.93	73.09
其他林地	8.83	8.47	8.46	8.34
耕地	578.01	572.94	554.37	553.41
草地	443.01	435.48	433.09	451.39
水域	15	12.02	12.43	12.18
建设用地	86.01	93.34	85.55	96.87
未利用地	1.05	0.95	0.68	0.96

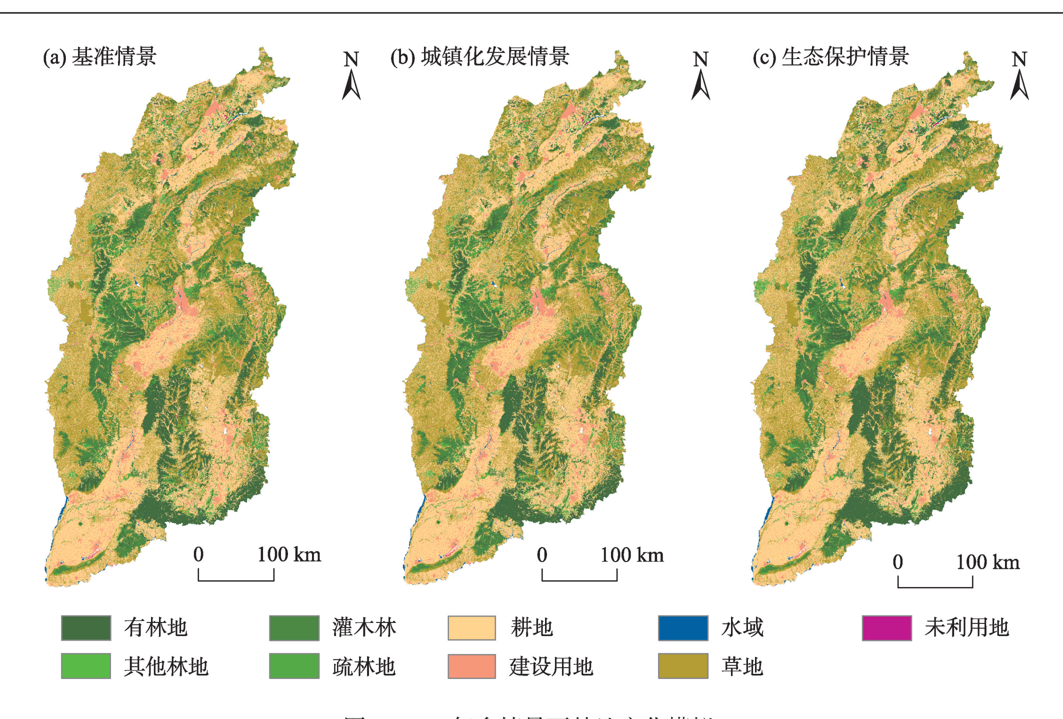


图4 2030年多情景下林地变化模拟

Fig. 4 Simulation of forest land change in 2030 under multiple scenarios

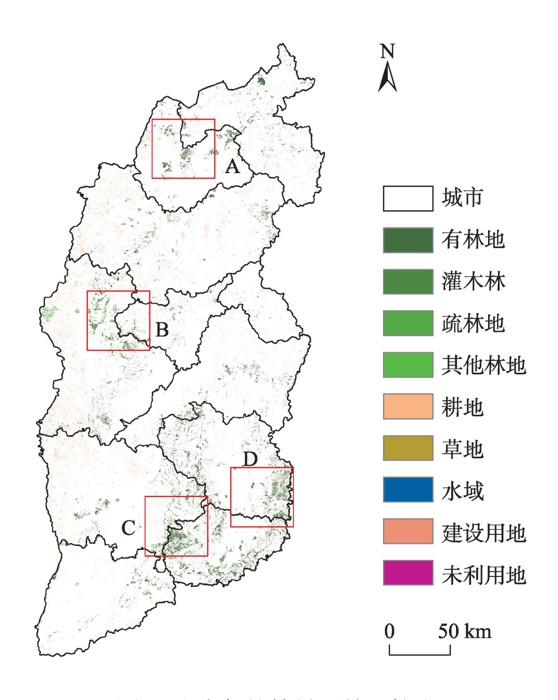


图5 生态保护情景下林地扩张

Fig. 5 Woodland expansion under the ecological protection scenario

构造稳定的森林生态系统产生胁迫,需考虑耕地红线这一基本底线。在理想状态下山西省未来植树造林的发展空间仅有5.38%,而现实往往比理想状态更糟糕。在当前的气候和政策背景下,山西省植树造林的潜力有待商榷,至少在当下不适合大规模种植,目前尚能解决的是在有限的造林空间内进一步实现林地优化。

从结果分析,A区应划为林地扩展一般区域。林地边界形状较为复杂,破碎化程度高,受人类活动的频繁干扰,可能存在建设用地扩张的胁迫。在新一轮的植树造林活动中需综合两个片区的人口、经济等社会因素确定各区域林地扩张的弹性边界,并加强对灌木林和草地的种植。B区现有灌木林面积较大,虽然存在疏林地向有林地转换的潜力,但是从因地制宜的角度分析,灌木林可能更适宜该地区的气候条件。C区和D区应划分为林地扩展极重要区。林业资源禀赋较好,碳储量发展空间较大。在温带和亚热带森林中,树种的多样性对碳储量的增加产生积极影响[38]。因此对C区和D区的林地扩展应注重树种多样性的提升。

4.2 研究不足

最后需要指出,本研究今后至少需要在以下两个方面继续推进:(1)模型方面,PLUS模型虽然可以模拟多种情景下土地利用变化情况,但是基于马尔科夫链模拟多种发展情景一定程度上具有主观性,对研究区经济发展的实际情况欠考虑。虽然土地利用变化特征也有较为明显的马尔科夫特征,但模型事实上并未考虑社会经济发展以及不同生产部门对土地的需求。而且若是不同时段内发展土地变化速度有较大差异,预测的结果也有很大的差

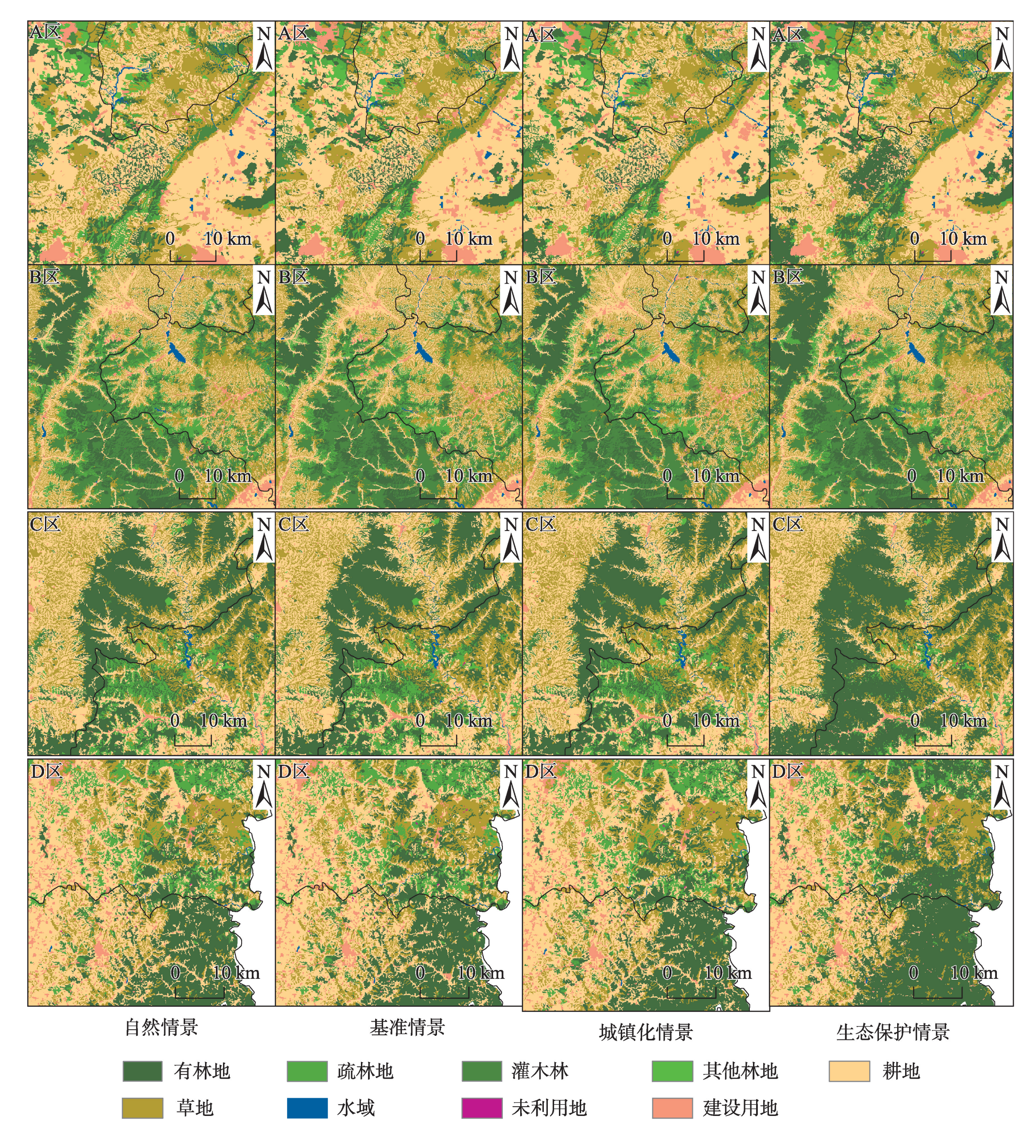


图6 林地优先发展区识别

Fig. 6 Identification of priority woodland development areas

异。在诸多研究中,有关学者采用系统动力学模型来推测不同发展情景下土地利用场景[39],更具备严谨性,这也为本研究的进一步延申提供了参考。(2)数据方面,关于识别框架的指标选取,影响森林扩张的因素有很多,例如气候条件、土壤肥力等[40-41],但目前尚未有可用的高精度空间数据进行分析。

5 结 论

本研究讨论了在所有造林的规划阶段遇到的两个关键性问题:“一是何处是造林适宜区? 二是如何集中?”本研究构建了针对山西省林地优先发展区识别框架对上述问题进行分析,借助PLUS模型和马尔科夫链系统模拟了2030年山西省不同情景下的土地利用变化情况,并界定未来林地潜在优先区。研究得出以下结论:(1) 在当前气候和政策条件下,山西省2030年林地增长空间非常有限,仅为5.38%。主要宜林地区域集中在东南部,以有林地扩张为主;其次为中部地区,以灌木林扩张为主,且林地边缘面临有林地退化的风险;最后为北部,

基于林地破碎化严重的现状,未来修复的导向更偏向于草地扩张。(2) 林地内部转换频率较高,各类林地按照扩展潜力高低划分,依次为:有林地>灌木林>疏林地>其他林地。(3) 从当前山西省的发展趋势来看,土地利用的方式是非可持续的,我们对山西省大规模植树造林的方式保持谨慎态度。且在耕地保护红线的限制下,认为生态保护情景的发展模式在山西省实施起来可能会存在困难。

参考文献(References):

[1] Yıldız O, Esen D, Sarginci M, et al. Restoration success in afforestation sites established at different times in arid lands of Central Anatolia[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 503(1): 378-1127.

[2] Cao S X, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 104(4): 240-245.

[3] Cortina J, Amat B, Castillo V, et al. The restoration of vegetation cover in the semi-arid Iberian southeast[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(12): 1377-1384.

[4] Morreale L L, Thompson J R, Tang X J, et al. Elevated growth and biomass along temperate forest edges[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 7181.

[5] Hudiburg T W, Law B E, Moomaw W R, et al. Meeting GHG reduction targets requires accounting for all forest sector emissions [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(9): 095005.

[6] Fischer R, Taubert F, Müller M S, et al. Accelerated forest fragmentation leads to critical increase in tropical forest edge area[J]. Science Advances, 2021, 7(37): 7012.

[7] Winkler K, Fuchs R, Rounsevell M, et al. Global land use changes are four times greater than previously estimated[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2501.

[8] Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, et al. The global tree resto-ration potential[J]. Science, 2019, 6448(365): 76-79.

[9] Laestadius L, Maginnis S, Minnemeyer S, et al. Mapping opportunities for forest landscape restoration[J]. Unasylva, 2011, 62: 47-48.

[10] Bryan B A, Gao L, Ye Y, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency[J]. Nature, 2018, 559: 193-204.

[11] 邬亚娟, 刘廷玺, 童新, 等. 基于面向对象的干旱半干旱地区植被分类[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 1026-1034. [Wu Yajuan, Liu Tingxi, Tong Xin, et al. Object-oriented classification of vegetation in arid and semi-arid regions[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 1026-1034.]

[12] Dang X, Gao S, Tao R, et al. Do environmental conservation programs contribute to sustainable livelihoods? Evidence from China's grain-for-green program in northern Shaanxi province[J]. Science of The Total Environment, 2020, 719: 137436.

[13] 裴宏伟, 刘孟竹, 李雅丽, 等. 生态修复措施对干旱半干旱地区生态系统服务影响研究——以河北坝上地区为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 192-199, 205. [Pei Hongwei, Liu Mengzhu, Li Yali, et al. Study on the impact of ecological restoration measures on ecosystem services in arid and semi-arid regions: An example from the dam area of Hebei[J]. Soil and Water Conservation Research, 2022, 29(2): 192-199, 205.]

[14] Dong L B, Li J W, Liu Y L, et al. Forestation delivers significantly more effective results in soil C and N sequestrations than natural succession on badly degraded areas: Evidence from the Central Loess Plateau case[J]. Catena, 2022, 208: 105734.

[15] Dulamsuren C, Klinge M, Degener J, et al. Carbon pool densities and a first estimate of the total carbon pool in the Mongolian forest-steppe[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 830-844.

[16] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.

[17] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584-593 [Yang Dan, Wang Xiaofeng. Effects of climate and human activities on vegetation NPP changes in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 584-593.]

[18] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 267-274. [Liu Guan, Li Guoqing, Li Jie, et al. Study of carbon stock changes and spatial patterns in the Mahta watershed from 1999-2016 based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274.]

[19] 罗云建, 张小全, 朱建华, 等. 关帝山林区退化灌木林转变为华北落叶松林对生态系统碳储量的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8354-8362. [Luo Yunjian, Zhang Xiaoquan, Zhu Jianhua, et al. Effects of transforming degraded shrubland to northern China larch forest in the Guandi Mountain forest area on ecosystem carbon stocks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8354-8362.]

[20] Wu X, Wang S, Fu B, et al. Spatial variation and influencing factors of the effectiveness of afforestation in China's Loess Plateau [J]. Science of The Total Environment, 2021, 771(1): 144904.

[21] Yu Y, Zhao W W, Martinez-Murillo J F, et al. Loess Plateau: From degradation to restoration[J]. Science of The Total Environment, 2020, 738(10): 140206.

[22] 王志印, 曹建生. 中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(9): 1319-1331. [Wang Zhiyin, Cao Jiansheng. Research progress on the restoration of vegetation and its ecological effects in soil and rocky mountain areas in northern China[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2019, 27(9): 1319-1331.]

[23] 王丽平, 段四波, 张霄羽, 等. 中国区域植树造林对地表温度的影响[J]. 遥感学报, 2021, 25(8): 1862-1872. [Wang Liping, Duan Sibo, Zhang Xiaoyu, et al. Effects of regional afforestation on sur-

face temperature in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25 (8): 1862–1872.]

[24] 王欢欢, 赵杰, 岳超, 等. 黄土高原植被恢复对地表的冷却作用及变化规律[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 214–220. [Wang Huanhuan, Zhao Jie, Yue Chao, et al. Cooling effect of vegetation restoration on the surface of loess plateau and the change pattern[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 214–220.]

[25] 肖玉, 谢高地, 甄霖, 等. 三北工程黄土高原丘陵沟壑区森林降温增湿效果研究[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5836–5846. [Xiao Yu, Xie Gaogao, Zhen Lin, et al. Research on the effect of forest cooling and humidification in the hilly and ravine areas of the Loess Plateau of the Three Northern Projects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5836–5846.]

[26] Zhang L, Sun P S, Huettmann Falk, et al. Where should China practice forestry in a warming world?[J]. Global Change Biology, 2022, 28(7): 2461–2475.

[27] 周璞. 山西省国土空间功能综合识别与分区优化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Zhou Pu. Study on Comprehensive Identification and Zoning Optimization of Spatial Functions of Land in Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]

[28] Han N L, Yu M, Jia P H. Multi-scenario landscape ecological risk simulation for sustainable development goals: A case study on the central mountainous area of Hainan Island[J]. Environmental Research and Public Health. 2022, 19(7): 19074030.

[29] 金梦婷, 徐丽萍, 徐权. 基于FLUS-Markov模型的多情景景观生态风险评价与预测——以南疆克州为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1793–1804. [Jin Mengting, Xu Liping, Xu Quan. Multi-scenario landscape ecological risk evaluation and prediction based on FLUS-Markov model: A case study of Kechu, South Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1793–1804.]

[30] Liang X, Liu X, Li D, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018, 32(11), 2294–2316.

[31] Zhai H, Lv C Q, Liu, W Z, et al. Understanding spatio-temporal patterns of land use/land cover change under urbanization in Wuhan, China, 2000–2019[J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3331.

[32] Wang Z Y, Li X, Mao Y T, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108499.

[33] Zhang D, Wang X, Qu L, et al. Land use/cover predictions incorporating ecological security for the Yangtze River Delta region, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106841.

[34] Sun G, Zhou G, Zhang Z, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328 (31): 548–558.

[35] 曹世雄. 生态修复项目对自然与社会的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(11): 101–108. [Cao Shixiong. Impacts of ecological restoration projects on nature and society[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(11): 101–108.]

[36] Cao S, Wang G, Chen L. Questionable value of planting thirsty trees in dry regions[J]. Nature, 2010, 465(5): 31.

[37] Ma H, Lv Y, Li H. Complexity of ecological restoration in China[J]. Ecological Engineering, 2013, 52(3): 75–78.

[38] Mathias M, Cindy E, Wafa E A. Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 31(15): 1–2.

[39] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94–116.

[40] Wang S, Zhang Y, Ju W, et al. Recent global decline of CO_2 fertilization effects on vegetation photosynthesis[J]. Science, 2020, 370 (6562): 1295–1300.

[41] 李雪柔, 陈飞燕, 林爱文, 等. 基于随机森林回归的茶园扩张驱动机制分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 44–52. [Li Xuerou, Chen Feiyan, Lin Aiwen, et al. Analysis of the driving mechanism of tea plantation expansion based on random forest regression[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36 (1): 44–52.]

Identification of priority areas for forest land expansion in Shanxi Province

MENG Na, ZHANG Ying
(School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Over the past 70 years, large-scale afforestation activities have been conducted in arid and semi-arid areas in China with remarkable success, but localized afforestation has failed due to regional human activities and climatic influences. Although the potential for afforestation in arid areas is recognized, it is unknown in which micro-region afforestation should be concentrated. Taking Shanxi Province, a typical region of the Loess Plateau, as an example, this study constructs a framework for the identification of forestable land and uses the PLUS and Markov models to simulate land use changes under different scenarios in 2030, analyzing woodland expansion, trends in internal changes in forest stands, and spatial distribution. The results show that: The current space for woodland growth in Shanxi Province is 5.38%, and the southeast is the main potential growth area; there is a possibility of woodland degradation at the edges of woodlands in the central and western parts of the province, while the degree of woodland fragmentation in the north is higher; the frequency of intra-forest conversion is higher; in order of expansion potential, there are woodland > shrubland > open woodland > other woodlands. In this context, a cautious attitude is taken toward large-scale afforestation in Shanxi Province. This study can provide a reference for effective afforestation management and enhancement of forest carbon sequestration levels in the Shanxi Province.

Keywords: PLUS model; Markov model; afforestation; scenario simulation; priority zone identification; arid and semi-arid areas